

بررسی تاثیر شکل محفظه داخلی و میزان تخلخل بر عملکرد گرمایی کوره‌های تولید زغال چوب جدارهای

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،
mehradd.kh1993@gmail.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، raisi@eng.sku.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، ghasemi@sku.ac.ir

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران، afshin.ahmadi@gmail.com

مهرداد خدامرادی چالش تری

افراسیاب رئیسی*

بهزاد قاسمی

افشین احمدی ندوشن

چکیده

در این تحقیق، عملکرد گرمایی سه کوره تولید زغال چوب جدارهای به صورت سه‌بعدی، شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. محفظه داخلی کوره‌ها به عنوان محفظه متخلخل متشکل از ذرات جامد چوب و سیال هوا که توسط کانال‌های عبور هوای گرم پوشانده شده است در نظر گرفته شده. از مدل دارسی-بریکمن-فورشهایمر برای محاسبه انتقال گرما درون محفظه متخلخل و همچنین روش جهت‌های مجزا (DO) برای محاسبه تابش درون محفظه متخلخل و کانال‌ها استفاده شده است. سرعت و دمای سیال ورودی به کانال‌ها به ترتیب 0.045 متر بر ثانیه و 850 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده و تاثیر مقادیر مختلف تخلخل (0.2 ، 0.4 ، 0.6) بر کانتورهای دما و نمودارهای دمای متوسط بررسی شده. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه کوره و تمامی مقادیر تخلخل، چوب‌های موجود در قسمت بالایی کوره‌ها در گام‌های ابتدایی فرآیند نسبت به چوب‌های قسمت پایین‌تر در دمای بالاتری قرار می‌گیرند. در هر سه کوره، افزایش تخلخل محفظه باعث افزایش یکنواختی دما درون محفظه در گام‌های انتهایی می‌شود. کوره شماره ۲ بهترین عملکرد را از نظر مقدار و یکنواختی دما درون محفظه متخلخل دارد.

واژه‌های کلیدی: تولید زغال، محفظه متخلخل، همرفت طبیعی، همرفت اجباری، تابش، رسانش.

Investigating the effect of internal chamber shape and porosity on the thermal performance of parietal charcoal production furnaces

M. Khodamoradi Chaleshtori

A. Raisi

B. Ghasemi

A. Ahmadi Nadooshan

Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract

In this research, the thermal performance of three parietal charcoal production furnaces was simulated and compared with each other. The Darcy-Brinkman-Forchheimer equation is used to model the flow behavior within the porous medium. Effect of radiation in channels and porous media are modeled with discrete ordinate (DO) radiation model. The velocity and temperature of the fluid inlet were considered to be 0.045 m/s and 850°C , respectively, and the effect of different porosity values (0.2 , 0.4 , 0.6) on the temperature contours and average temperature graphs was investigated. The results show that in the initial steps of the process, in all three furnaces and all porosity values, the wood in the upper part of the furnaces is at a higher temperature than the wood in the lower part. In all three furnaces, increasing the porosity amount of the chamber, increases the temperature uniformity within the chamber in the final steps. Furnace number 2 has the best performance in terms of temperature value and uniformity within the porous chamber.

Keywords: Charcoal production, Porous media, Forced convection, Natural convection, Radiation, Conduction.

دنبال دارد. در روش صنعتی، از کوره‌های مخصوص، جهت تولید زغال استفاده می‌گردد. که استفاده از این روش علاوه بر حذف معایب تولید زغال چوب به روش سنتی، امکان استحصال سرکه چوب را فراهم می‌کند. آنتال و گرونی [۱] دانش تولید و خواص زغال چوب که در طول ۳۸ هزار سال گذشته جمع‌آوری شده است را به طور خلاصه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اظهار داشتند که زغال چوب به عنوان یک سوخت تجدیدپذیر، ویژگی‌های جذاب بسیاری دارد: عملاً حاوی گوگرد یا جیوه نیست و نیتروژن و خاکستر کمی دارد. بسیار واکنش‌پذیر بوده، و نگهداری و جایجایی آن آسان است. بیسواس و ماهانتا [۲] به بررسی

۱- مقدمه

زغال چوب، ماده‌ای سبک، شکننده و سیاه رنگ است که از باقی‌مانده فرآیند نیم سوختن چوب یا دیگر اندام‌های گیاهی بدست می‌آید و قسمت اعظم ترکیبات آن تبدیل به کربن شده است. در روش سنتی تولید زغال، چوب‌ها را درون گودال‌های بزرگ ریخته و آن‌ها را می‌سوزانند تا زغال بدست آید. این روش معایب فراوانی همچون رها شدن گازهای حاصل از احتراق چوب‌ها درون جو، امکان آتش‌سوزی جنگل‌ها، خطرات جانی و یکسان نبودن کیفیت زغال‌های تولیدی را به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: raisi@eng.sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۴/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۰/۲۲

معایب روش‌های مرسوم تولید زغال بامبو پرداختند. نتایج نشان داد در روش سنتی، ناهمگونی دمای بالایی درون محفظه وجود دارد. گرمایش غیر یکنواخت منجر به تبدیل ضعیف بامبو به زغال می‌شود. دمای بسیار بالا در انتهای پخت باعث سوختن بامبو شده و به ضعف بازده خالص فرآیند می‌افزاید. کاجینا و همکاران [۳] کوره‌ها و فناوری تولید زغال چوب و اثرات زیست محیطی آنان را در چند کشور مختلف مورد بررسی قرار دادند. آکیاما و چانگ [۴] برهمکنش همرفت طبیعی با تابش سطح خاکستری را در محفظه مربعی پر از هوا بررسی کردند. دو دیوار جانبی عمودی، دمای متفاوت داشته و سایر دیوارهای مرزی، عایق گرمایی بودند. نتایج هیچ تفاوت قابل توجهی با افزایش گسیل پذیری تحت یک عدد رایلی خاص نشان ندادند. وانگ و همکاران [۵] عملکرد گرمایی گیرنده متخلخل (در جمع کننده بشقاب خورشیدی) را با ترکیب روش ردیابی اشعه مونت کارلو (MCRT) و توابع تعریف شده توسط کاربر در نرم‌افزار Fluent بررسی کردند. نتایج نشان داد، حداکثر دمای فاز جامد و ضخامت منطقه غیرتعادلی گرمایی با افزایش تخلخل افزایش یافته و دمای فاز جامد با افزایش گسیل، کاهش می‌یابد. نورآذر و محمدپور [۶] انتقال گرما در پره متخلخل را با در نظر گرفتن هر دو اثر تابش و همرفت طبیعی بررسی کردند. آنها از مدل جهت‌های مجزا (DO) و معادله دارسی-برینکمن-فورشهایمر برای مدل‌سازی تابش و معادله مومنتوم در ناحیه متخلخل استفاده کرده و نشان دادند نادیده گرفتن اثر تابش، ۱۰-۲۰ درصد خطا در مقدار عدد ناسلت ایجاد می‌کند. ترشیزی و همکاران [۷] جریان واکنشی درون یک مشعل متخلخل را با توسعه یک کد کامپیوتری و با افزودن جمله دارسی و برینکمن به معادله مومنتوم و روش عدم تعادل گرمایی مدل کردند. نتایج نشان دهنده کاهش دما در طول مشعل با کاهش تخلخل است. تقیلو و خرمنی [۸] به بررسی عددی مدیریت گرمایی یک دسته باتری لیتیوم-یونی در حضور محیط متخلخل و مواد تغییر فاز دهنده، طی فرآیند ذخیره و تخلیه پرداختند. نتایج نشان داد که در خنک کاری با هوا و در حضور محیط متخلخل، دما بیشینه به اندازه ۷/۱۴ کلوین نسبت به عدم وجود محیط متخلخل، کاهش می‌یابد. سیواسانکاران و هوانسوری [۹] انتقال گرمای همرفت طبیعی در یک حفره متخلخل با گرمایش سینوسی بر روی دو دیوار جانبی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که که آهنگ انتقال گرما با افزایش نسبت نوسان، تخلخل و عدد دارسی افزایش می‌یابد. لاوریات و پارساد [۱۰] به بررسی انتقال گرمای همرفت طبیعی درون یک محفظه متخلخل به روش برینکمن-دارسی توسعه یافته پرداختند. آن‌ها اثر عدد دارسی و عدد رایلی را بر جریان در داخل محفظه بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش عدد دارسی برای یک عدد رایلی و نسبت ابعاد مشخص، آهنگ انتقال گرما از محفظه کاهش می‌یابد. میخائیل شرم [۱۱] انتقال گرمای همرفت طبیعی غیردائم را در یک محفظه متخلخل سه‌بعدی بررسی نمود. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رایلی، زمان لازم برای رسیدن به حالت پایدار افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عدد دارسی سبب تغییرات غیرخطی در عدد ناسلت متوسط می‌شود. نیاز روزافزون به تولید زغال چوب برای مصارفی چون سوخت شومینه، باریکیو و سایر وسایل مشابه، همچنین استفاده‌های متنوع دیگر از جمله در صنعت، کشاورزی، ساخت و ساز ساختمان، بهداشت، هنر و غیره از طرفی و از طرف دیگر اهمیت حفاظت از منابع چوب و

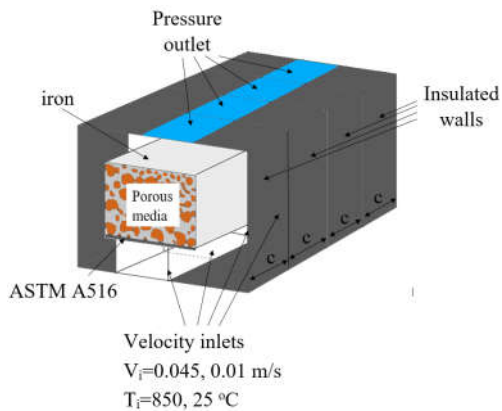
کاهش خطرات جانی و آلودگی‌های زیست محیطی تولید زغال چوب به روش سنتی و اقبال بیشتر برای استفاده از کوره‌های صنعتی زغال چوب از عوامل انجام تحقیق حاضر است. همچنین با توجه به بررسی منابع، گرچه انتقال گرمای همرفت طبیعی درون محفظه‌های حاوی محیط متخلخل و انتقال گرمای همرفت اجباری درون کانال‌ها در شرایط مختلف به صورت جداگانه به خوبی بررسی شده است، اما برهمکنش همرفت طبیعی داخل محفظه‌های متخلخل و همرفت اجباری درون کانال‌ها مورد توجه قرار نگرفته است.

۲- مبانی و روش‌ها

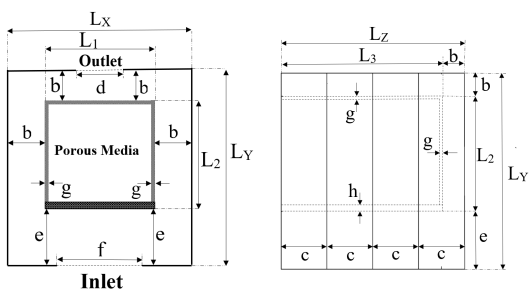
۲-۱- بیان مسئله

در این تحقیق، عملکرد گرمایی سه نمونه از کوره‌های تولید زغال چوب جداره‌ای به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. کوره شماره ۱، یک نمونه از کوره‌های جداره‌ای معمول موجود در بازار بوده که از یک محفظه برای بارگذاری قطعات چوب که اطراف آن را چهار کانال عبور هوای گرم (گرمایش هوا با استفاده از مشعل‌های گازی صورت می‌گیرد). پوشانده، تشکیل شده است. محفظه داخلی، به عنوان یک محفظه متخلخل متشکل از ذرات جامد چوب و سیال هوا در نظر گرفته شده است. در کوره شماره ۲، محفظه داخلی از ۱۲ مکعب متخلخل که اطراف آن با سیال هوا پوشانده شده، تشکیل شده و در کوره شماره ۳، محفظه داخلی و کانال‌ها به صورت استوانه‌ای و منحنی طراحی شده‌اند. دیواره‌های بالا و جانبی محفظه متخلخل از جنس آهن و با ضخامت 1.5 cm و دیواره پایینی محفظه از دولایه ورق آتشیخوار (فولاد ASTM A516) به ضخامت 2.5 cm ساخته شده‌اند. خواص ترموفیزیکی مواد در جدول ۱ و ابعاد اصلی کوره و محفظه‌ها در شکل‌های ۱-۳ (الف، ب و ج) و جدول ۲ آورده شده است. ابعاد، اندازه و فواصل در هر سه کوره به گونه‌ای انتخاب شده که امکان مقایسه نتایج در هر سه مورد وجود داشته باشد. فرضیات زیر برای شبیه‌سازی مسئله در نظر گرفته شده:

۱. جریان همرفت اجباری درون کانال‌ها و همرفت طبیعی درون محفظه متخلخل، لایه‌ای، تراکم‌ناپذیر و گذرا فرض شده است.
۲. محیط متخلخل، همگن و ایزوتروپیک در نظر گرفته شده و به علت نفوذپذیری ذاتی چوب‌ها و تخلخل قابل ملاحظه ایجاد شده مابین قطعات چوب با چیدمان نامنظم، عدد دارسی ۰/۱ برای محیط متخلخل فرض شده است. همچنین در هر نقطه دمای سیال با دمای ذرات جامد برابر فرض شده است [۱۲].
۳. به علت دمای بالا و تاثیرپذیری خواص هوا از دما، خواص ترموفیزیکی هوای درون محفظه متخلخل و کانال‌ها همچنین چگالی هوای درون کانال‌ها با استفاده از معادلات ۱-۳ که توسط زگرافوس و همکاران [۱۳] ارائه شده محاسبه شده است. برای محاسبه چگالی هوای درون محفظه متخلخل از شرط گاز ایده‌آل استفاده شده و لزجت در هر دو مورد از قانون Sutherland محاسبه شده است.
۴. از مدل جهت‌های مجزا (discrete ordinate(DO)) برای محاسبه انتقال گرما تابشی درون محفظه متخلخل و کانال‌ها استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش هزینه محاسباتی متوسط برای گسسته‌سازی‌های زاویه‌ای و احتیاج به حافظه کم است. [۶].

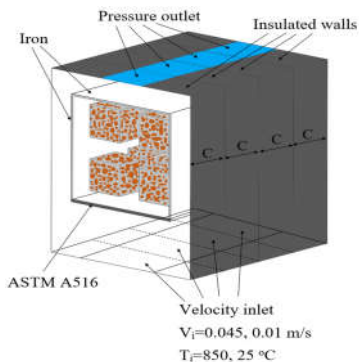


شکل ۱- الف- نمای سه‌بعدی کوره شماره ۱

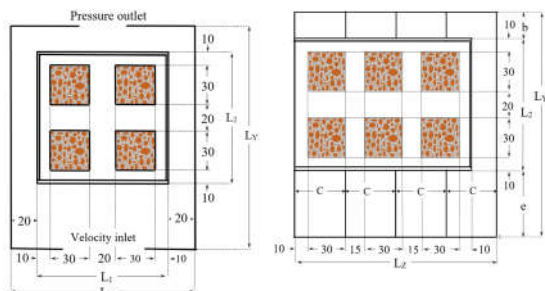


شکل ۱- ج- نمای روبرو از کوره شماره ۱

شکل ۱- ب- نمای جانبی از کوره شماره ۱



شکل ۲- الف- نمای سه‌بعدی کوره شماره ۲



شکل ۲- ج- نمای روبرو از کوره شماره ۲

شکل ۲- ب- نمای جانبی از کوره شماره ۲

۵. به دلیل وجود ذرات بخار آب و گاز دی‌اکسید کربن در محصولات احتراق متان، همچنین به دلیل آزاد شدن مقادیری از بخار آب در حین فرآیند پخت زغال چوب، هوای درون محفظه متخلخل و کانال‌ها (در هنگام روشن بودن مشعل) از نظر تابشی فعال فرض شده است. (در هنگام خاموش بودن مشعل، هوای درون کانال‌ها از نظر تابشی غیرفعال فرض می‌شود).

۶. برای محاسبه خواص تابشی هوای درون محفظه متخلخل و کانال‌ها از مدل گاز خاکستری (gray-gas model) استفاده شده [۱۴] و بر اساس روابط لکنر [۱۵] ضریب جذب ۰/۵ و ۰/۳۱ به ترتیب برای هوای درون کانال‌ها (در هنگام روشن بودن مشعل) و محفظه متخلخل انتخاب شده است. و مطابق تحقیق کسمائی و همکاران [۱۶] ضریب صدور در هر دو مورد ۰/۰۱ فرض شده. (در هنگام خاموش بودن مشعل این ضرایب برای هوای درون کانال‌ها صفر فرض شده است).

۷. تمامی سطوح محفظه متخلخل و کانال‌ها کدر و خاکستری با ضریب صدور ۰/۶ در نظر گرفته شده است [۱۶].

در این تحقیق، عملکرد گرمایی سه نمونه از کوره‌های جداره‌ای تولید زغال چوب برای سه میزان تخلخل $\varepsilon = 0.2, 0.4, 0.6$ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده در قالب کانتورها و نمودارهای دما با یکدیگر مقایسه شده است. سرعت و دمای ورودی در زمان روشن بودن مشعل به ترتیب $v_i = 0.045$ m/s و $T_i = 850$ °C در نظر گرفته شده است. در زمان خاموشی مشعل، گرمایی محفظه سبب جریان یافتن هوای محیط در کانال‌ها می‌شود که سرعت و دمای این جریان به ترتیب $v_i = 0.01$ m/s و $T_i = 25$ °C فرض شده است. برنامه زمانی کارکرد مشعل در جدول ۳ آورده شده است.

$$\rho = \frac{345.57}{(T - 2.6684)} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

$$C_p = 1.3864 \times 10^{-13} T^4 - 6.4747 \times 10^{-10} T^3 + 1.0234 \times 10^{-6} T^2 - 4.3282 \times 10^{-4} T + 1.0613 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \right] \quad (2)$$

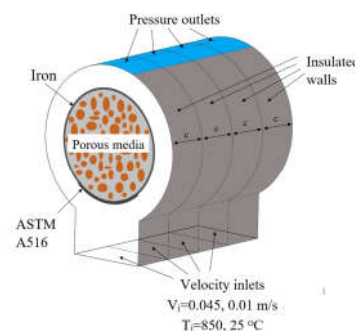
$$k = 1.5797 \times 10^{-17} T^5 - 9.4600 \times 10^{-14} T^4 + 2.2012 \times 10^{-10} T^3 - 2.3758 \times 10^{-7} T^2 + 1.7082 \times 10^{-4} T - 7.488 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right] \quad (3)$$

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی مواد

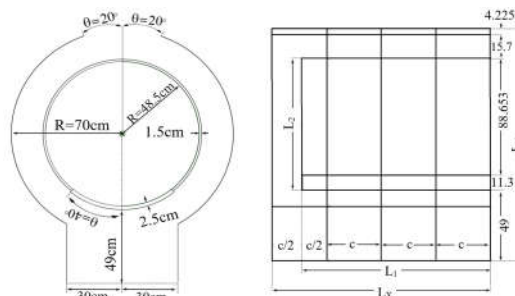
	ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	C_p $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg.K}} \right]$	k $\left[\frac{\text{W}}{\text{m.K}} \right]$	μ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right]$	α $\left[\frac{1}{\text{m}} \right]$	σ_s $\left[\frac{1}{\text{m}} \right]$
هوای محفظه	گاز	معادله	معادله	Sutherland's law	۰/۳۱	۰/۱
هوای کانال‌ها	معادله (۱)	(۲)	(۳)		۰/۵	۰
آتش خوار	۷۸۰۰	۴۷۰	۵۲	-	-	-
آهن	۷۸۷۰	۴۴۰	۷۶/۲	-	-	-
چوب	۷۰۰	۲۳۱	۰/۱۷۳	-	-	-

جدول ۲- ابعاد کوره

اندازه (cm)	L _X	L _Y	L _Z	L ₁	L ₂	L ₃	a
	۱۲۰	۱۷۰	۱۶۰	۸۰	۱۰۰	۱۴۰	۴۰
	b	c	d	e	f	g	h
	۲۰	۴۰	۴۰	۵۰	۶۰	۱/۵	۲/۵



شکل ۳- الف- نمای سه‌بعدی کوره شماره ۳



شکل ۳- ج- نمای روبرو از کوره شماره ۳

شکل ۳- ب- نمای جانبی از کوره شماره ۳

جدول ۳- برنامه زمانی کارکرد مشعل

ساعت	۶-۰	۸-۶	۱۶-۸	۱۸-۱۶	۲۸-۱۸	۳۰-۲۸
وضعیت	روشن	خاموش	روشن	خاموش	روشن	خاموش
ساعت	۳۰	۴۰-۴۲	۴۲	۶۰-۶۱	۶۱-۷۲	
وضعیت	روشن	خاموش	روشن	خاموش	روشن	

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات بقا شامل معادله بقای جرم، بقای مومنتوم و بقای انرژی می‌شوند. با فرض جریان لایه‌ای، غیردائم، تراکم‌ناپذیر و سه بعدی، معادلات حاکم برای همرفت اجباری درون کانال‌ها و همرفت طبیعی درون محفظه متخلخل برای هر سه کوره، به صورت زیر بیان می‌شوند. از فرمول دارسی-بریکمن-فورشه‌ایمر [۱۷] برای شبیه سازی جریان درون محیط متخلخل با در نظر گرفتن هر دو اثر اینرسی و لزجت، استفاده شده است. مدل دارسی-بریکمن-فورشه‌ایمر یکی از چند مدل مورد استفاده برای تحلیل جریان در محیط متخلخل است که با اضافه کردن یک فرم لاپلاسی به معادله فورشه‌ایمر ایجاد شده است [۱۷]. این مدل به طور گسترده برای تحلیل جریان در محیط‌های متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه کلادیاس و پارساد [۱۸] انتقال گرمای همرفت درون یک محفظه متخلخل را به صورت تجربی بررسی

کرده و نشان دادند نتایج به طور کامل از اثرات پارامترهای جریان سیال (اعداد ریلی و پرانتل)، پارامترهای ساختار ماتریس متخلخل (اعداد دارسی و فورچه‌ایمر) و نسبت رسانایی که توسط فرمول بندی مبتنی بر معادلات حرکت دارسی-بریکمن-فورشه‌ایمر (DBF) پیش‌بینی شده است، پشتیبانی می‌کنند. میزان انتقال گرمای تابشی درون محفظه متخلخل و کانال‌ها، با استفاده از روش جهت‌های مجزا (DO) محاسبه [۶] و تمامی سطوح به صورت خاکستری با ضریب صدور $\epsilon' = 0.6$ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در هر نقطه از محیط متخلخل دمای فاز جامد و سیال باهم برابر است. معادلات حاکم برای همرفت طبیعی درون محفظه متخلخل [۱۷]:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^2} (\mathbf{V} \cdot \nabla u) &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial X} + v_m \nabla^2 u - \frac{v_f}{K} u \\ &- \frac{C_F}{\sqrt{K}} |V| u \\ \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^2} (\mathbf{V} \cdot \nabla v) &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial Y} + v_m \nabla^2 v - \frac{v_f}{K} v \\ &- \frac{C_F}{\sqrt{K}} |V| v + g^i d^i v \\ \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^2} (\mathbf{V} \cdot \nabla w) &= -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial Z} + v_m \nabla^2 w - \frac{v_f}{K} w \\ &- \frac{C_F}{\sqrt{K}} |V| w \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f \mathbf{V} \cdot \nabla T = k_m \nabla^2 T + S_{rad} \quad (6)$$

در معادلات (۴) تا (۶)، ϵ بیانگر میزان تخلخل محیط متخلخل، v_m لزجت سینماتیکی موثر محیط متخلخل است که با توجه به تحقیقات لاندگرن [۱۹] مقدار آن با مقدار v_f برابر در نظر گرفته می‌شود؛ K بیانگر نفوذپذیری و C_F ضریب اینرسی محیط متخلخل هستند. که بر مبنای تحقیقات ارگون [۲۰] $C_F = 1.75 / (\sqrt{150} \cdot \epsilon^{1.5})$ ، $C_F = 1.75 / (\sqrt{150} \cdot \epsilon^{1.5})$ ، k_m رسانایی گرمایی موثر محیط متخلخل است؛ به طوری که $k_m = (1 - \epsilon) k_s + \epsilon k_f$ و k_s, k_f به ترتیب بیانگر رسانایی گرمایی سیال و جامد هستند.

معادلات حاکم برای همرفت اجباری درون کانال‌ها [۲۱]:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla u) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial X} + v(\nabla^2 u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla v) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Y} + v(\nabla^2 v) + g^i d^i v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla w) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial Z} + v(\nabla^2 w) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla T) = \alpha (\nabla^2 T) + S_{rad} \quad (9)$$

در معادلات (۷) تا (۹) ρ, v, α به ترتیب برابر چگالی، لزجت سینماتیکی، حجم و پخشندگی گرمایی هستند.

S_{rad} نشان دهنده جمله تابش در معادلات انرژی (۶) و (۹) است [۶].

$$S_{rad} = \nabla \cdot \mathbf{q}_{rad} \quad (10)$$

$$\mathbf{q}_{rad} = \int_0^\infty I_\lambda \mathbf{s} \cdot d\Omega \quad (11)$$

۲-۵- روش حل عددی

شبیه‌سازی مسئله با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 2021 انجام گرفته است. جریان درون محفظه متخلخل و کانال به صورت لایه‌ای و گذرا فرض شده و برای کوپلینگ معادلات سرعت و فشار از روش PISO استفاده شده است. برای گسسته‌سازی معادلات فشار از روش مرتبه دوم و معادلات مومنوم و انرژی از روش بالادستی مرتبه دوم، استفاده شده است. معادلات تابش نیز با استفاده از روش بالا دستی مرتبه اول گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی در هر گام زمانی برای معادلات انرژی و تابش 10^{-6} و سایر معادلات 10^{-3} در نظر گرفته شده است.

جدول ۴- مقادیر ناسلت متوسط بدست آمده از تحقیق حاضر و نتایج

کیم و کانگ [۲۲] (Pr = 0.7, A = 0, W / H = 1)

تحقیق حاضر	کیم و کانگ	عدد رینولدز
۱۰/۳۸	۱۰/۲۵	۵۰۰
۱۱/۳۱	۱۱/۱۳	۷۰۰
۷/۵۳	۷/۴	۵۰۰
۹/۲۳	۹	۷۰۰

جدول ۵- مقادیر ناسلت متوسط بدست آمده از تحقیق حاضر و نتایج

نیتیاراسو و همکاران [۲۲] در Pr=1

عدد داری	عدد رایلی	$\varepsilon = 0.4$		$\varepsilon = 0.6$	
		نیتیاراسو و همکاران	تحقیق حاضر	نیتیاراسو و همکاران	تحقیق حاضر
۴-۱۰	۱۰ ^۵	۱/۰۶۷	۱/۰۷۲	۱/۷۱	۱/۷۹
	۱۰ ^۶	۲/۵۵	۲/۶۹	۲/۷۲۵	۲/۸۳۵
۱۰-۲	۱۰ ^۳	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۱۵	۱/۰۲۱
	۱۰ ^۴	۱/۴۰۸	۱/۴۱۳	۱/۵۳	۱/۵۵۳

جدول ۶- عدد ناسلت تشعشی (Nu_r) بدست آمده از تحقیق حاضر و

نتایج آکیاما و چونگ [۴] ($\theta_0 = 29.35, T_0 = 293.5$)

عدد رایلی	$\varepsilon' = 0.5$		$\varepsilon' = 1$	
	آکیاما و چونگ	تحقیق حاضر	آکیاما و چونگ	تحقیق حاضر
۱۰ ^۵	۴/۲	۴/۰۶	۷	۶/۷۳
۱۰ ^۶	۱۰	۹/۶۱	۱۵	۱۴/۲۷

۲-۶- استقلال حل از تعداد نقاط شبکه و گام زمانی

به منظور اطمینان از عدم تاثیر کیفیت شبکه و تعداد نقاط آن همچنین تاثیر گام زمانی بر دقت نتایج بدست آمده، تغییر دمای متوسط محفظه متخلخل با گذر زمان در تخلخل ۰/۶، در تعداد نقاط مختلف شبکه و گام‌های زمانی مختلف بررسی شده و نتایج در شکل‌های ۴ الف و ب آورده شده است. مشخص است که نتایج بدست آمده از شبکه‌ای با تعداد ۳۱۹۲۹۷ نقطه، و گام زمانی ۱۸۰ ثانیه دقت

برای محاسبه انرژی تابش، معادله انتگرالی- دیفرانسیلی تابش به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۶]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = K_\lambda I_{b\lambda} + (K_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (12)$$

در معادله (۱۲)، K_λ نشان دهنده ضریب جذب، σ_s ضریب پخش، $I_{b\lambda}$ شدت تابش جسم سیاه بوده و تابعی از دما می‌باشند. $\phi(\vec{s}, \vec{s}')$ نیز به تابع فازی پخش است.

۲-۳- شرایط مرزی

با توجه به شرط عدم لغزش و عدم نفوذ روی تمامی دیواره‌های محفظه و کانال‌ها، عایق بودن کلیه دیواره‌های خارجی و دیواره‌های جدا کننده کانال‌ها، همچنین شرط رسانش گرما در دیواره‌های محفظه متخلخل، شرایط مرزی دمایی و اولیه به صورت زیر تعریف می‌شوند.

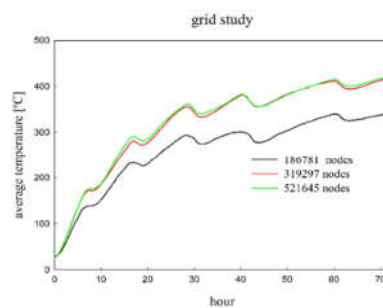
$$\left. \begin{aligned} t=0 \quad T_p &= 25^\circ C \\ q_{in}^* &= k \frac{\partial T}{\partial n}, \quad n = X, Y, Z \\ &\text{for all walls of porous enclosure} \\ u = v = w &= 0 \\ &\text{for all walls of channels \& porous media} \\ X=0, L_X \quad \frac{\partial T}{\partial X} &= 0 \\ Y=0, L_Y \quad \frac{\partial T}{\partial Y} &= 0 \\ Z=0, L_Z \quad \frac{\partial T}{\partial Z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

که T_p بیانگر دمای اولیه سیال درون محفظه متخلخل و کانال‌ها است.

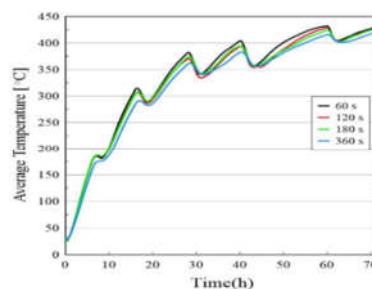
۲-۴- صحت‌سنجی حل عددی

به منظور اطمینان از صحت روش حل و نتایج حاصل از شبیه‌سازی، موارد تحقیقاتی دیگر، با روش حاضر شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده با مقاله مربوطه مقایسه شده است. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی جریان اجباری درون کانال‌ها، جریان گذرنده از روی دو مانع دما ثابت که بر روی ضلع پایین یک کانال عبور هوا قرار داشته شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده با نتایج مطالعه کیم و کانگ [۲۲] مقایسه و در جدول ۴ آورده شده است. همچنین برای تایید درستی روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان طبیعی درون محفظه متخلخل، نتایج بدست آمده برای شبیه‌سازی جریان طبیعی درون یک محفظه متخلخل دو بعدی با نتایج مقاله نیتیاراسو و همکاران [۲۳] مقایسه و در جدول ۵ آورده شده است. برای تایید درستی روش استفاده شده برای محاسبه انتقال گرمای تابشی نیز، آهنگ انتقال گرمای تابشی در یک محفظه مربعی پر از هوا در حالی که دیواره‌های جانبی آن در دمای متفاوت قرار داشته و دیواره‌های افقی عایق بودند، به روش جهت‌های مجزا شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از تحقیق آکیاما و چونگ [۴] مقایسه و در جدول ۶ آورده شده است.

مناسی برای شبیه‌سازی دارند.



شکل ۴-الف- تغییرات دمای متوسط محفظه متخلخل با گذر زمان در تعداد نقاط مختلف شبکه ($\epsilon = 0.6$)



شکل ۴-ب- تغییرات دمای متوسط محفظه متخلخل با گذر زمان در گام‌های زمانی مختلف ($\epsilon = 0.6$)

۳- نتایج

قبل از ارائه نتایج لازم است تا به صورت مختصر درباره فرآیند تبدیل شدن چوب به زغال، توضیحاتی ارائه شود. بر اساس تحقیقات سیرد [۲۴] در دمای بین ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سلسیوس، چوب گرما را جذب نموده و رطوبت خود را به صورت بخار آب از دست می‌دهد. در دمای تقریبی بین ۱۰۰ تا ۲۷۰ درجه سلسیوس چوب شروع به تجزیه شدن و از دست دادن برخی از ترکیبات مانند دی‌اکسید و مونوکسید کربن به همراه اسید استیک و متانول می‌نماید. دمای بین ۲۷۰ تا ۲۹۰ درجه سلسیوس دمایی است که تجزیه اگزوترمیک چوب آغاز می‌شود. چوب‌ها زیر این دما خنک نمی‌شوند. در دمای بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس گازهای خروجی از منواکسید کربن، دی‌اکسید کربن، هیدروژن و متان تشکیل می‌شود. همچنین مقادیر قابل توجهی از آب، اسید استیک، متانول و استن به صورت بخار از چوب خارج می‌گردد. در دمای ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس، کربونیزاسیون تکمیل شده و چوب‌ها عملاً به زغال تبدیل می‌شوند. اما ممکن است تا ۳۰٪ وزنی حاوی مواد قیری باشند که با گرمادهی نهایی مقدار زیادی از مواد قیری داخل چوب خارج شده زغال‌هایی کیفیت مناسب تولید می‌شود. نکته دیگری که در زمینه تولید زغال با کیفیت اهمیت دارد، آن است که یکنواختی دما در کوره و همچنین ماندگاری دمای کوره در مقادیر مشخص، سبب افزایش بسیار زیاد کیفیت زغال می‌گردد. برای این

منظور برنامه زمانی مناسب برای پخت زغال با توجه به نوع چوب و اندازه قطعات حائز اهمیت است. همچنین علت عمده گام‌های زمانی که در آن مشعل خاموش می‌گردد علاوه بر کاهش مصرف سوخت و افزایش عمر مشعل و دیواره‌های کوره، به منظور یکنواختی دما در محفظه متخلخل و ماندگاری چوب‌ها در دمای مشخص است.

در شکل‌های ۵، ۶ و ۸ کانتورهای دما درون محفظه متخلخل کوره‌ها، به ترتیب در مقادیر تخلخل ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ و در چهار گام زمانی مختلف از فرآیند تولید زغال، رسم شده است. کانتورهای دما برای کوره‌های ۱ و ۳ بر روی صفحات XY در $Z = [0.15, 0.7, 1.25]$ [m] و در صفحه YZ مرکزی محفظه متخلخل رسم شده است.

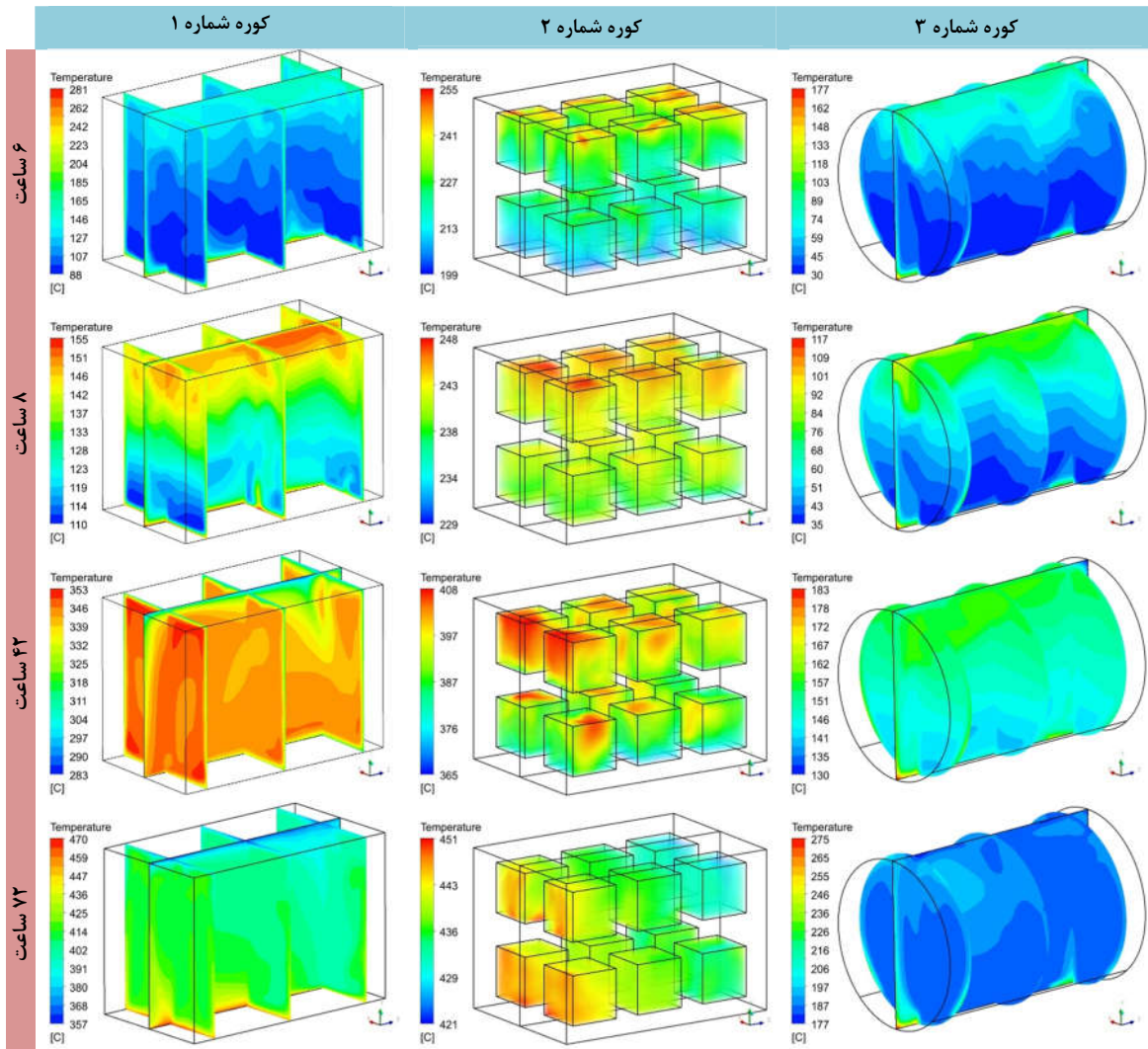
در ابتدای فرآیند پخت به علت تفاوت دمای زیاد بین دمای محفظه و سیال ورودی به کانال‌ها، دمای محفظه به سرعت افزایش یافته و انتقال گرمای همرفت تقویت می‌شود. این موضوع سبب صعود هوای گرم به قسمت بالای محفظه و ناهمگونی دما درون محفظه می‌شود. مقایسه کانتورهای دما در شکل‌های ۵، ۶ و ۸ نیز نشان می‌دهد که در هر سه کوره و تمامی مقادیر تخلخل، چوب‌های موجود در قسمت بالای کوره‌ها در گام‌های ابتدایی فرآیند نسبت به چوب‌های قسمت پایین‌تر در دمای بالاتری قرار می‌گیرند. با گذشت زمان و افزایش دما، از یک طرف انتقال گرمای تابشی تقویت شده و از طرف دیگر با افزایش ضریب انتقال گرمایی هوا، رسانندگی گرما نیز تقویت می‌شود این عوامل سبب می‌شود تا دما درون محفظه متخلخل یکنواخت‌تر گردد. این موضوع با مقایسه کانتورهای دما در زمان‌های ۶ و ۷۲ ساعت که انتهای دو گام زمانی روشن بودن مشعل در ابتدا و انتهای فرآیند پخت را نشان می‌دهد، به خوبی قابل مشاهده است.

مقایسه شکل‌های ۵، ۶ و ۷ همچنین نشان می‌دهد که در هر سه کوره، افزایش تخلخل محفظه باعث افزایش یکنواختی دما درون محفظه در گام‌های انتهایی شده و چوب‌ها در گام‌های ابتدایی در دمای بالاتری قرار می‌گیرند.

با مقایسه کانتورهای دما در زمان‌های ۶ و ۸ ساعت که ابتدا و انتهای یک گام زمانی خاموشی مشعل را نشان می‌دهد، مشخص می‌شود که با گذشت یک گام خاموشی برای هر سه کوره، دمای بیشینه کاهش و دمای کمینه افزایش یافته و دما درون محفظه یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین مشخص می‌شود که افزایش تخلخل این یکنواختی دما درون محفظه را بهبود می‌بخشد.

مقایسه کانتورهای دما برای کوره‌های شماره ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد که در اوایل فرآیند پخت زغال و در تمامی مقادیر تخلخل، چوب‌های موجود در کوره شماره ۲، دمای بالاتر و یکنواخت‌تری را تجربه می‌کنند. با گذشت زمان، دمای چوب‌ها در کوره‌های ۱ و ۲ به یکدیگر نزدیک شده اما دمای چوب‌های موجود در کوره ۳، بسیار پایین‌تر از دو کوره دیگر است.

در شکل‌های ۸، ب و ج نمودار تغییرات دمای متوسط محفظه متخلخل برای هر سه کوره (برای کوره شماره ۲ از میانگین دمای مکعب‌های متخلخل استفاده شده است.) در مقادیر تخلخل ۰/۲، ۰/۴ و



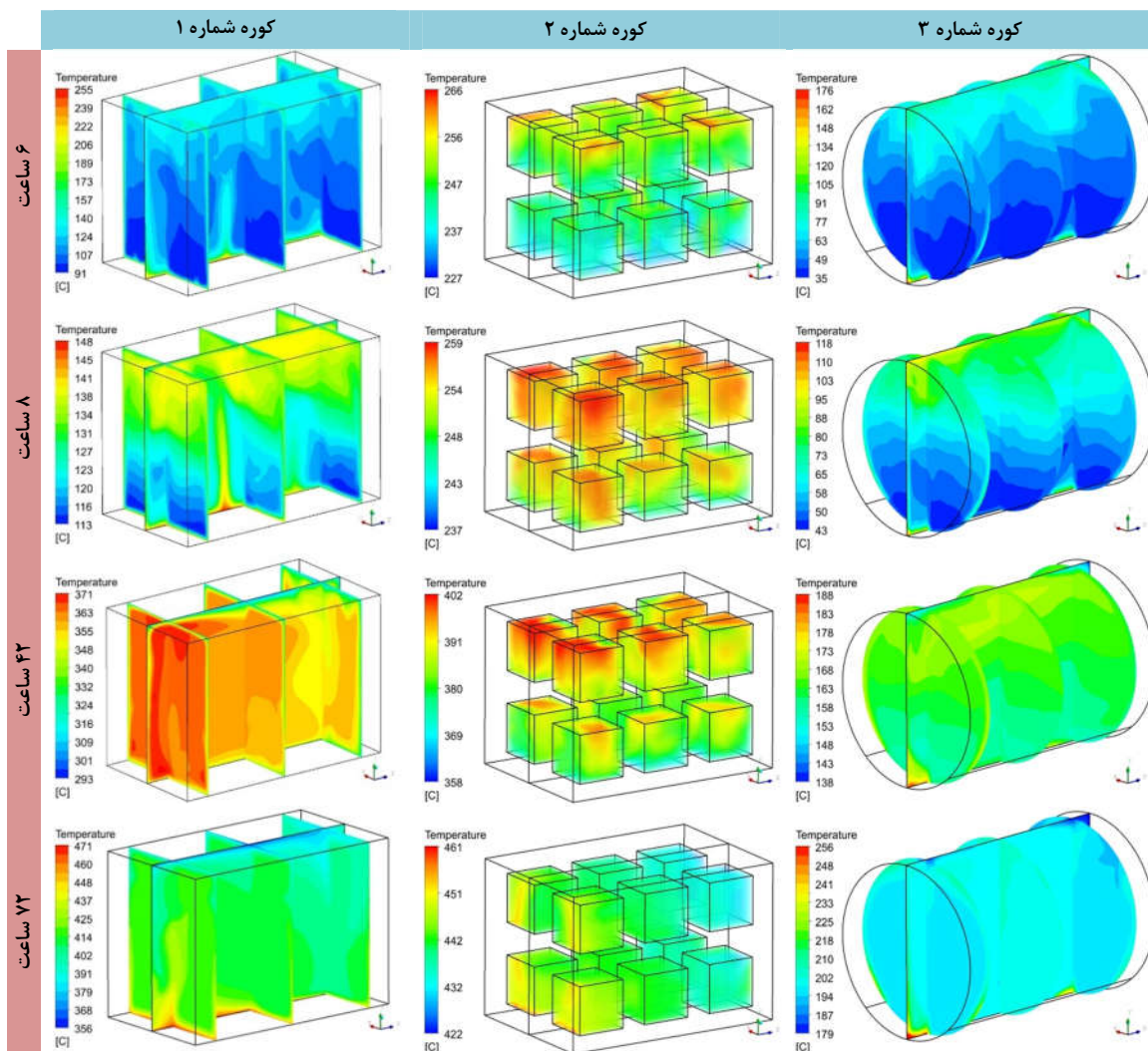
شکل ۵- کانتور دما درون محفظه متخلخل کوره‌های شماره ۱، ۲، و ۳ در گام‌های زمانی مختلف و مقدار تخلخل $\varepsilon = 0.2$

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد گرمایی سه کوره تولید زغال جداره‌ای به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و با یکدیگر مقایسه شده است. محفظه داخلی کوره‌ها به صورت متخلخل متشکل از ذرات جامد چوب و سیال هوا در نظر گرفته شده است و از مدل دارسی-بریگمن-فورشهایمر برای محاسبه انتقال گرما درون محفظه متخلخل و همچنین روش جهت‌های مجزا (DO) برای محاسبه تابش درون محفظه متخلخل و کانال‌ها استفاده شده است. سرعت و دمای سیال ورودی به کانال‌ها به ترتیب 0.45 متر بر ثانیه و 850 درجه سلسیوس در نظر گرفته شده و تاثیر مقادیر مختلف تخلخل (0.2 ، 0.4 ، 0.6) بر کانتورهای دما و نمودارهای دمای متوسط بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد

۱- در هر سه کوره و تمامی مقادیر تخلخل، چوب‌های موجود در قسمت بالای کوره‌ها در گام‌های ابتدایی فرآیند نسبت به چوب‌های قسمت پایین‌تر در دمای بالاتری قرار می‌گیرند.

0.6 رسم شده است. مشخص است که در تمامی مقادیر تخلخل، دمای متوسط کوره شماره ۳ بسیار پایین‌تر از دو کوره دیگر است. اختلاف دمای متوسط محفظه برای کوره‌های شماره ۱ و ۲ در اوایل فرآیند پخت زغال، بسیار زیاد است که با گذشت زمان، مقدار این اختلاف خصوصا در تخلخل‌های بالاتر بسیار کاهش می‌یابد. همچنین افزایش تخلخل سبب کاهش این اختلاف دما حتی در گام‌های ابتدایی می‌شود. شکل‌های ۹ الف، ب و ج تغییرات دمای متوسط محفظه متخلخل را برای کوره‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در مقادیر مختلف تخلخل نشان می‌دهد. مشخص است که تغییرات تخلخل کمترین تاثیر را بر دما درون محفظه کوره شماره ۲ دارد و دمای متوسط محفظه برای تمامی مقادیر تخلخل در کوره شماره ۲ تقریبا یکسان است. در کوره شماره ۱ افزایش تخلخل سبب افزایش دمای محفظه در گام‌های ابتدایی شده اما در انتهای فرآیند پخت، دمای محفظه در هر سه مقدار تخلخل، به یکدیگر نزدیک می‌شود.



شکل ۶- کانتور دما درون محفظه متخلخل کوره‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در گام‌های زمانی مختلف و مقدار تخلخل $\varepsilon = 0.4$

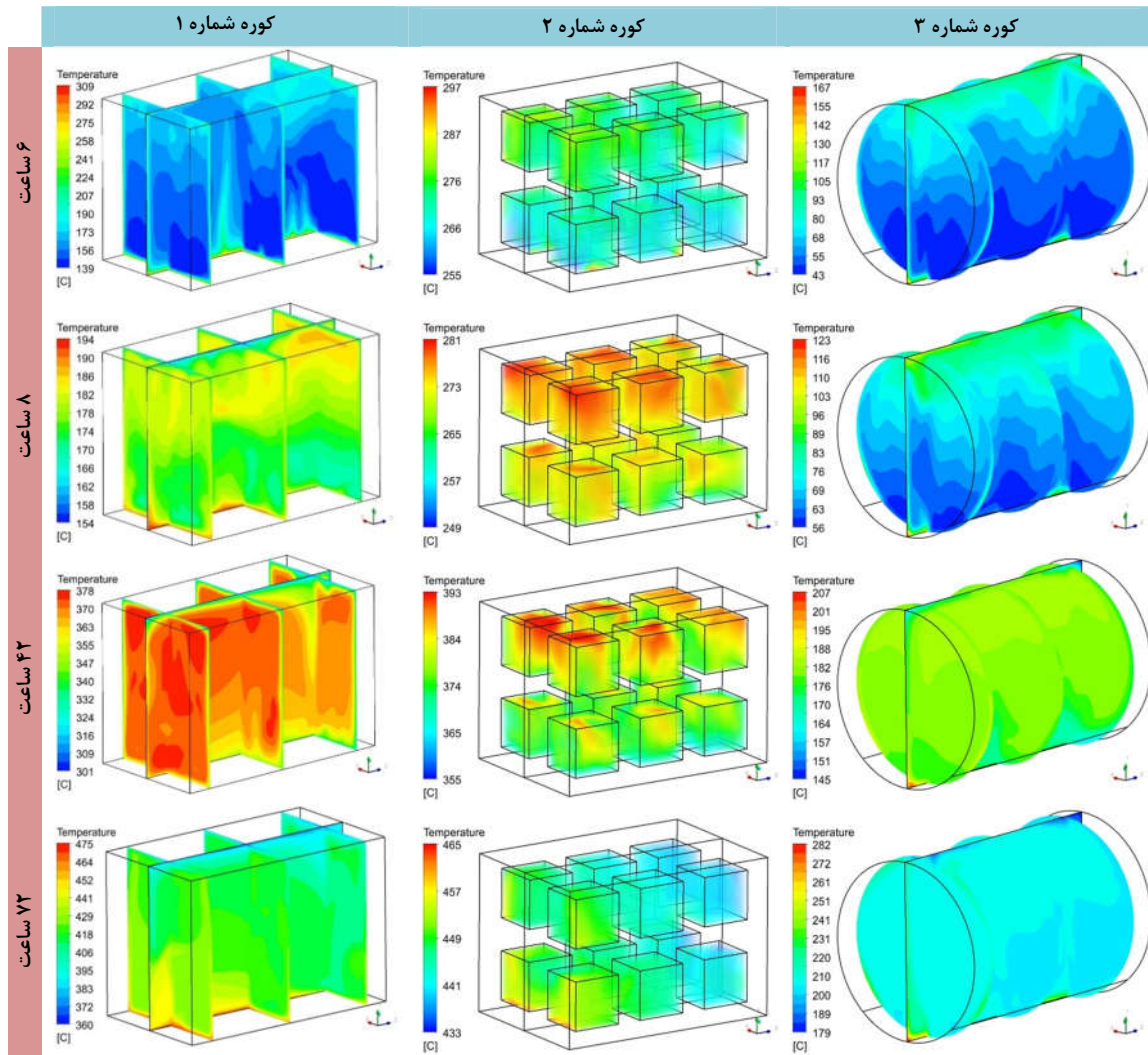
بارگذاری چوب با تقسیم محفظه به مکعب‌های متخلخل، مزیت آن نسبت کوره شماره ۱ را کاهش می‌یابد.

۲- در هر سه کوره، افزایش تخلخل محفظه باعث افزایش یکنواختی دما درون محفظه در گام‌های انتهایی شده و چوب‌ها در گام‌های ابتدایی در دمای بالاتری قرار می‌گیرند.

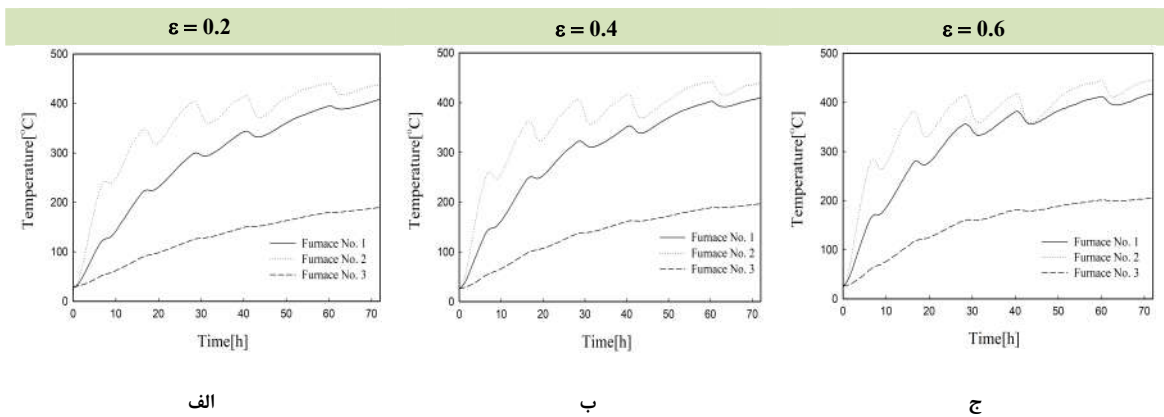
۳- در تمامی مقادیر تخلخل، دمای متوسط کوره شماره ۳ بسیار پایین‌تر از دو کوره دیگر است. اختلاف دمای متوسط محفظه برای کوره‌های شماره ۱ و ۲ در اوایل فرآیند پخت زغال، بسیار زیاد است که با گذشت زمان، مقدار این اختلاف خصوصا در تخلخل‌های بالاتر بسیار کاهش می‌یابد.

۴- تغییرات تخلخل کمترین تاثیر را بر دما درون محفظه کوره شماره ۲ دارد و دمای متوسط محفظه برای تمامی مقادیر تخلخل در کوره شماره ۲ تقریباً یکسان است.

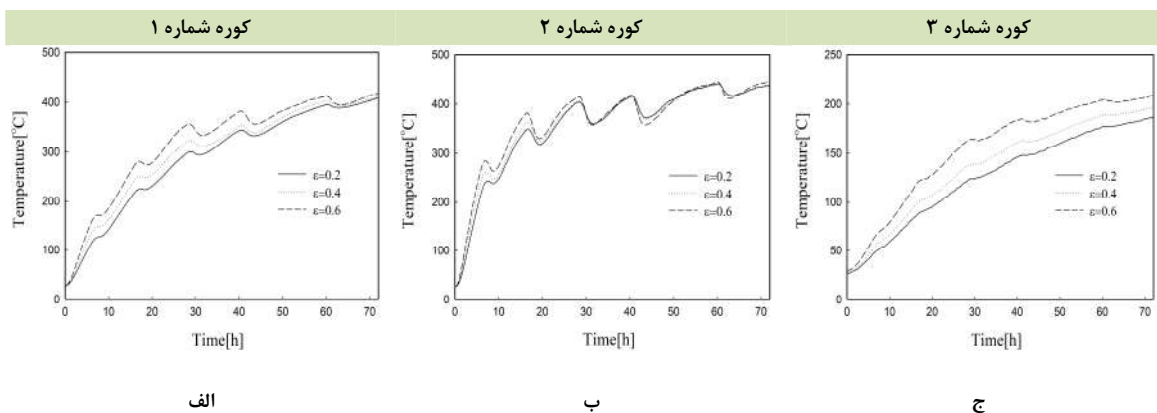
۵- به طور کلی کوره شماره ۲ بهترین عملکرد را از نظر مقدار و یکنواختی دما درون محفظه متخلخل دارد. اما نزدیک شدن دمای محفظه‌ها با افزایش تخلخل از یک طرف و از طرف دیگر کاهش حجم



شکل ۷- کانتور دما درون محفظه متخلخل کوره‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در گام‌های زمانی مختلف و مقدار تخلخل $\epsilon = 0.6$



شکل ۸- نمودار دمای متوسط محفظه متخلخل برای هر سه کوره در (الف) $\epsilon = 0.2$ (ب) $\epsilon = 0.4$ (ج) $\epsilon = 0.6$



شکل ۹- نمودار دمای متوسط محفظه متخلخل برای الف) کوره شماره ۱ (ب) کوره شماره ۲ (ج) کوره شماره ۳ در تخلخل‌های مختلف

۵- مراجع

- [۱۴] ظفریان ص.، حسینی سروری س. م.، منصوری س. ح. مقایسه مدل‌های خاکستری و مجموع وزنی گازهای خاکستری بر پایه خط طیف در طراحی معکوس چشمه‌های حرارتی در محیط‌های غیرخاکستری. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷؛ ۴۸(۳): ۱۶۷-۱۷۶.
- [15] Modest MF, Mazumder S. Radiative heat transfer. Academic press; 2021 Oct 16.
- [۱۶] سمائی س.، نوری س.، کسمائی س. بررسی عددی پارامترهای مؤثر در انتقال حرارت تشعشعی فرایند احتراق اکسیژنی کوره‌های گازی چرخشی. نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۷، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۶۴ تا ۱۶۷
- [17] Nield DA, Bejan A. Convection in porous media. New York, NY: Springer New York; 2006 Feb 23.
- [18] Kladias N, Prasad V. Experimental verification of Darcy-Brinkman-Forchheimer flow model for natural convection in porous media. Journal of thermophysics and heat transfer. 1991 Oct;5(4):560-76.
- [19] Lundgren TS. Slow flow through stationary random beds and suspensions of spheres. Journal of fluid mechanics. 1972 Jan;51(2):273-99.
- [20] Ergun S. Fluid flow through packed columns. Chemical engineering progress. 1952;48(2):89.
- [21] Atashafrooz M, Nassab SG. Simulation of three-dimensional laminar forced convection flow of a radiating gas over an inclined backward-facing step in a duct under bleeding condition. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2013 Feb;227(2):332-45.
- [6] نورآذر س.، محمدپور م. ر. بررسی عددی انتقال حرارت در پره متخلخل با توزیع تخلخل ناهمگن و با در نظر گرفتن اثر تشعشع حرارتی. مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳۹۷؛ ۱۸(۹): ۱۵۱-۱۶۲
- [۷] ترشیزی م.، خالقی ح.، محمدزاده ک. مدل‌سازی عددی جریان واکنشی آشفته درون ماده متخلخل. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز ۱۳۹۷؛ ۴۸(۴): ۸۵-۷۷
- [۸] تقیلو م.، خرمی ی. بررسی عددی مدیریت گرمایی ترکیبی یک دسته باتری لیتیوم-یونی در حضور ماده تغییر فاز دهنده و محیط متخلخل طی فرایند ذخیره و تخلیه. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۱۸، شماره ۹۰، آذر ۱۳۹۷
- [9] Sivasankaran S, Bhuvanewari M. Natural convection in a porous cavity with sinusoidal heating on both sidewalls. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2013 Jan 1;63(1):14-30.
- [10] Lauriat G, Prasad V. Natural convection in a vertical porous cavity: a numerical study for Brinkman-extended Darcy formulation.
- [11] Sheremet MA. Unsteady conjugate natural convection in a three-dimensional porous enclosure. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2015 Aug 3;68(3):243-67.
- [12] Mayerhofer M, Govaerts J, Parmentier N, Jeanmart H, Helsen L. Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles. Powder Technology. 2011 Jan 10;205(1-3):30-5.
- [13] Zografos AI, Martin WA, Sunderland JE. Equations of properties as a function of temperature for seven fluids. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1987 Mar 1;61(2):177-87.